Sciences participatives :

Une ressource inexploitée pour la recherche européenne sur les sols

Cet article a été publié en anglais dans la revue European Journal of Soil Science :

Mason, E., Gascuel-Odoux, C., Aldrian, U., Sun, H., Miloczki, J., Götzinger, S., Burton, V.J., Rienks, F., Di Lonardo, S., & Sandén, T. (2024). Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research. European Journal of Soil Science, e13470. https://doi.org/10.1111/ejss.13470

Etude et Gestion des Sols remercie les éditeurs pour leur accord de publication de cette version en français.

E. Mason(1*), C. Gascuel-Odoux(2), U. Aldrian(3), J. Miloczki(4), S. Götzinger(4), V. J. Burton(5), F. Rienks(6), S. Di Lonardo(7, 8) et T. Sandén(4)

1) INRAE, Info&Sols, Orléans, France
2) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, Rennes, France
3) Data, Statistics & Integrative Risk Assessment, Austrian Agency for Health and Food Safety (AGES), Graz, Austria
4) Department for Soil Health and Plant Nutrition, Austrian Agency for Health and Food Safety (AGES), Vienna, Austria
5) Natural History Museum, London, UK
6) Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW), Wageningen, the Netherlands
7) Research Institute on Terrestrial Ecosystems-National Research Council (IRET-CNR), Sesto Fiorentino, Italy
8) National Biodiversity Future Center (NBFC), Palermo, Italy

* Auteur correspondant : elo.mason@gmail.com

RÉSUMÉ

Les sols sont des éléments clés de nos écosystèmes et fournissent 95 % à 99 % de notre nourriture. Cette importance se reflète par une augmentation des projets de sciences participatives sur les sols. Les sciences participatives sont une méthode de recherche qui implique les citoyens dans la démarche scientifique pour générer de nouvelles connaissances ou compréhensions. Ici, nous passons en revue les projets passés et actuels de sciences participatives sur les sols agricoles à travers l'Europe. Nous avons mené une enquête en ligne et décrit 24 projets européens de sciences participatives en tenant compte des 10 principes des sciences participatives de l'Association Européenne de la Science Citoyenne (ECSA), tout en identifiant leurs facteurs de réussite. Plus de 66 % des projets ont généré des données sur la biodiversité des sols ; 54 % des projets ont généré des données sur la couverture végétale et 42 % sur le carbone organique du sol. Nos résultats montrent que les projets de sciences participatives sur la thématique des sols, qui respectent les 10 principes de l'ECSA, offrent une ressource inexploitée pour la recherche sur la santé des sols en Europe. Nous concluons que promouvoir la co-création, favoriser les réseaux de partage de connaissances, ainsi que permettre une communication et un engagement à long terme avec les citoyens sont des facteurs de réussite pour le développement futur des sciences participatives sur les sols.

Mots-clés

EJPSOIL, agroécosystèmes européens, recherche participative, biodiversité des sols, santé des sols, enquête en ligne

Comment citer cet article :
Mason E., Gascuel-Odoux C., Aldrian U., Miloczki J., Götzinger S., Burton V. J., Rienks F., Di Lonardo S. et Sandén T., (2025). Sciences participatives : Une ressource inexploitée pour la recherche européenne sur les sols. Étude et Gestion des Sols, Vol. 32, pp. 95-113.

SUMMARY

PARTICIPATORY SOIL CITIZEN SCIENCE: An unexploited resource for European soil research

Soils are key components of our ecosystems and provide 95%–99% of our food. This importance is reflected by an increase in participatory citizen science projects on soils. Citizen science is a participatory research method that actively involves and engages the public in scientific enquiry to generate new knowledge or understanding. Here, we review past and current citizen science projects on agricultural soils across Europe. We conducted a web-based survey and described 24 reviewed European citizen science projects in the light of the 10 principles of citizen science and identified success factors for citizen science. Over 66% of the projects generated soil biodiversity data; 54% and 42% of the projects generated data on vegetation cover and soil organic carbon, respectively. Our findings show that soil citizen science projects aligned with the 10 principles of citizen science offer an unexploited resource for European soil health research. We conclude that promoting co-creation, fostering knowledge-sharing networks and enabling long-term communication and commitment with citizens are success factors for further development of citizen science on soils.

Key-words

EJPSOIL, European agroecosystems, participatory research, soil biodiversity, soil health, web-based survey

RESUMEN

CIENCIAS PARTICIPATIVAS: Un recurso sin explotar para la investigación europea sobre los suelos

Los suelos son elementos clave de nuestros ecosistemas y proporcionan entre el 95% y el 99% de nuestro alimento. Esta importancia se refleja en un aumento de los proyectos de ciencia participativa sobre los suelos. Las ciencias participativas son un método de investigación que implica a los ciudadanos en el proceso científico para generar nuevos conocimientos o nuevas comprensiones. Aquí revisamos los proyectos actuales y pasados de ciencia participativa sobre suelos agrícolas en toda Europa. Hemos llevado a cabo una encuesta en línea y descrito 24 proyectos europeos de ciencias participativas teniendo en cuenta los 10 principios de las ciencias participativas de la Asociación Europea de Ciencia Ciudadana (ECSA), identificando sus factores de éxito. Más del 66% de los proyectos generaron datos sobre la biodiversidad del suelo; el 54% de los proyectos generaron datos sobre la cubierta vegetal y el 42% sobre el carbono orgánico del suelo. Nuestros resultados muestran que los proyectos de ciencia participativa sobre la temática del suelo, que cumplen con los 10 principios de la ECSA, ofrecen un recurso sin explotar para la investigación sobre la salud del suelo en Europa. Concluimos que promover la co-creación, favorecer las redes de intercambio de conocimientos, así como permitir una comunicación y un compromiso a largo plazo con los ciudadanos son factores de éxito para el desarrollo futuro de las ciencias participativas sobre los suelos.

Palabras clave

EJPSOIL, agroecosistemas europeos, investigación participativa, biodiversidad del suelo, salud del suelo, encuesta en línea

1. INTRODUCTION

Le sol est une base majeure de la santé et de la production de ressources (FAO et ITPS, 2015). Il constitue une ressource naturelle limitée et non renouvelable qui stocke, filtre et transforme de nombreuses substances, y compris l'eau, les nutriments et le carbone. Le sol est crucial pour l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques, la production agricole et la sécurité alimentaire, ainsi que pour la préservation de la nature et de la biodiversité (Helming *et al*., 2018 ; Schirpke *et al*., 2017). Maintenir la santé des sols, définie par la Mission Sol "A Soil Deal for Europe" comme "la capacité continue des sols à soutenir les services écosystémiques", est vital (Veerman *et al*., 2020). Néanmoins, les sols sont menacés à la fois en Europe et dans le monde (FAO et ITPS, 2015 ; Popp *et al*., 2014 ; Veerman *et al*., 2020). En conséquence, ces dernières années, de nombreuses politiques ont été mises en œuvre par la Commission européenne pour promouvoir la santé des sols en Europe. Le programme européen EJP SOIL "Vers une gestion climatique et durable des sols agricoles", lancé par l'Union européenne (2020-2025), constitue une initiative majeure pour développer une communauté de recherche européenne intégrée sur les sols agricoles. La recherche en sciences du sol est essentielle pour comprendre et améliorer la contribution des sols agricoles aux grands défis sociétaux. La santé des sols doit être mesurable (Van der Putten *et al*., 2023). Combler efficacement l'écart entre notre état actuel de connaissances et les besoins sociétaux nécessite un effort commun impliquant un ensemble diversifié de parties prenantes (Mol et Keesstra, 2012). Cependant, environ la moitié de la population mondiale vivrait déconnectée de l'environnement naturel (MacEwan *et al*., 2017). Cela suggère qu'une grande partie de la population mondiale pourrait également être déconnectée du sol.

Les sciences participatives sont une méthode de recherche qui implique activement les citoyens dans la démarche scientifique pour générer de nouvelles connaissances ou compréhensions. Bien qu'il n'existe pas de définition officielle de ces méthodologies et que la discussion sur les types d'activités et de pratiques qui en font partie soit toujours en cours (Haklay *et al*., 2021), les projets de sciences participatives consistent à engager les citoyens et à solliciter leur participation à la classification, à la collecte de données et/ou à la co-création (Pino *et al*., 2022 ; Reynolds *et al*., 2021). Cette approche améliore notre capacité à capturer les informations sur le terrain. Cet article distingue les scientifiques, qui sont des professionnels formés réalisant des recherches scientifiques ou résolvant des problèmes scientifiques, des citoyens, qui sont des membres du public qui ne proviennent pas du monde académique, qui collectent et analysent des données, généralement dans le cadre d'un projet participatif. Un citoyen peut aussi être une personne qui co-construit des projets avec des scientifiques en prenant en compte différents types de connaissances (scientifiques et empiriques) pour répondre à de nouvelles questions de recherche, aborder de nouvelles problématiques autour des données ou créer de nouvelles connaissances intégrées. En 2015, l'Association Européenne de la Science Citoyenne (ECSA) a élaboré des lignes directrices pour les bonnes pratiques des sciences participatives, résumées sous 10 principes (ECSA, 2015 ; *Tableau 1*). Ces 10 principes servent de référence pour examiner les projets existants de sciences participatives et soutenir le développement de nouveaux projets de haute qualité (Robinson *et al*., 2018). Le nombre de tels projets augmente rapidement (Pocock *et al*., 2017), y compris des projets sur les sols (Ranjard, 2020 ; Ranjard *et al*., 2022). Néanmoins, les résultats de ces projets sont encore peu publiés dans les revues académiques, comme en témoigne la faible taille du corpus scientifique lorsque l'on croise les mots-clés 'soil' et 'citizen science*'. La Web of Science (consultée le 7 mars 2023) fournit 191 publications, dont les deux tiers ont été publiées au cours des 2 dernières années. A titre de comparaison, le croisement des termes 'biodiversity' et 'citizen science' donne 1184 articles. Cela signifie-t-il que la mise en œuvre de telles approches est plus difficile pour les sols que pour d'autres composantes de l'environnement ? Quels sont les succès et/ou les difficultés rencontrées pour de tels projets ? Pour répondre à ces questions, nous avons mené une consultation participative à l'échelle de plusieurs pays européens, en nous concentrant sur les sols agricoles. Les sols agricoles peuvent être définis au sens large comme des sols cultivés qui produisent de la biomasse, pour la nourriture, l'alimentation animale, la fibre ou la bioénergie.

L'objectif principal de cet article, initialement publié en anglais dans European Journal of Soil Science (Mason *et al.,* 2024), était de synthétiser la compréhension actuelle et l'utilisation des approches de sciences participatives pour la construction de connaissances concernant les sols à travers l'Europe. Cette synthèse passe en revue des exemples de projets passés et actuels collectés de sciences participatives sur la santé des sols à travers l'Europe. Les 10 principes des sciences participatives fournissent un cadre dans lequel nous examinons les projets collectés.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour dresser un état des lieux des projets de sciences participatives appliqués aux sols en Europe, en mettant l'accent sur les sols agricoles, nous avons mené une enquête en ligne. Nous avons invité des experts et des points de contact nationaux du programme EJP SOIL, ainsi que toute personne pertinente identifiée par ces derniers, à remplir notre questionnaire en ligne. Au-delà des coordinateurs expérimentés de projets de sciences participatives, nous avons également interrogé des personnes n'ayant pas encore participé à ce type d'initiative, afin

Tableau 1 : Les dix principes des sciences participatives (ECSA, 2015) (d'après Mason *et al.*, 2024).
Table 1: *Ten principles of citizen science (ECSA, 2015) (from Mason et al., 2024).*

1.	Les projets de sciences participatives **impliquent activement les citoyens** dans une démarche scientifique visant à générer de nouvelles connaissances ou compréhensions. Les citoyens peuvent agir en tant que contributeurs, collaborateurs ou même responsables de projet, et jouent un rôle significatif dans celui-ci.
2.	Les projets de sciences participatives produisent un véritable **résultat scientifique**. Par exemple, ils peuvent répondre à une question de recherche ou alimenter des actions de conservation, des décisions de gestion ou des politiques environnementales.
3.	Les **scientifiques** comme les **citoyens bénéficient** de leur implication dans ces projets. Les bénéfices peuvent inclure la publication de résultats, des opportunités d'apprentissage, un enrichissement personnel, des avantages sociaux, la satisfaction de contribuer à des données scientifiques servant des enjeux locaux, nationaux ou internationaux, et la possibilité d'influencer les politiques.
4.	Les citoyens peuvent, s'ils le souhaitent, **participer à plusieurs étapes du processus scientifique**. Cela peut inclure la formulation des questions de recherche, la conception de la méthode, la collecte et l'analyse des données, ainsi que la diffusion des résultats.
5.	Les citoyens reçoivent un **retour d'information** de la part du projet. Par exemple, sur l'utilisation de leurs données, ou sur les retombées scientifiques, politiques ou sociétales du projet.
6.	Les sciences participatives sont considérées comme une approche de recherche à part entière, avec leurs **limites et biais, qui doivent être pris en compte et contrôlés**. Toutefois, contrairement aux approches traditionnelles, elles offrent une opportunité renforcée d'implication du public et de démocratisation de la science.
7.	Les **données et métadonnées** issues des projets de sciences participatives sont rendues **accessibles au public** et, lorsque cela est possible, les résultats sont publiés en accès libre. Le partage des données peut avoir lieu pendant ou après le projet, sauf en cas de préoccupations liées à la sécurité ou à la confidentialité.
8.	Les citoyens participants sont **remerciés dans les résultats et les publications du projet**.
9.	Les **programmes** de sciences participatives sont **évalués** selon leur production scientifique, la qualité des données, l'expérience des participants et leur impact sociétal ou politique.
10.	Les responsables des projets de sciences participatives **prennent en compte les aspects juridiques et éthiques** relatifs aux droits d'auteur, à la propriété intellectuelle, aux accords de partage des données, à la confidentialité, à l'attribution, ainsi qu'à l'impact environnemental des activités.

d'évaluer le potentiel pour de futurs projets. En fonction de leur expérience auto-déclarée dans la gestion de projets de sciences participatives, nous avons désigné les répondants soit comme des « coordinateurs » lorsqu'ils avaient déjà (co-)organisé un projet de sciences participatives, soit comme des « novices » lorsqu'ils n'avaient pas encore appliqué des approches de sciences participatives dans leur travail.

Pour une vue d'ensemble plus compréhensible des 10 principes des sciences participatives, nous avons regroupé les principes en trois catégories distinctes : (i) la participation aux projets de sciences participatives ; (ii) l'ouverture des projets de sciences participatives ; et (iii) l'efficacité des projets de sciences participatives.

2.1. Questionnaire en ligne

Le questionnaire était basé sur une initiative précédente d'INRAE en France (Gascuel *et al.*, 2023 ; Ranjard *et al.*, 2022) et a été adapté à la diversité des pays européens et des agroécosystèmes associés, ainsi qu'à notre propre objectif de recherche. Le questionnaire comprenait une logique de branchement, qui orientait les répondants vers différentes sous-sections en fonction de leurs réponses. Trois questions générales étaient posées initialement, après quoi le questionnaire était divisé en question pour les coordinateurs (éléments de base du projet, 10 principes des sciences participatives, questions liées à l'EJP SOIL, évaluation du projet) et pour les novices. Les questions adressées aux novices étaient limitées aux stratégies garantissant le succès des projets de sciences participatives. Les questions posées aux coordinateurs visaient à : (i) collecter des exemples de projets passés et actuels axés sur les sols agricoles ; (ii) décrire les projets en fonction des 10 principes mentionnés ci-dessus (ECSA, 2015 ; *Tableau 1*) ; et (iii) identifier les facteurs de succès et les défis. L'enquête pour les coordinateurs et les novices comprenait respectivement 34 et 8 questions, y compris des questions filtrantes.

Les répondants à l'enquête ont été recrutés en ligne *via* des invitations par e-mail envoyées à des personnes à l'intérieur

et à l'extérieur de l'EJP SOIL, à travers les points de contact nationaux de l'EJP SOIL, ainsi que *via* la liste de diffusion de l'Association Européenne de la Science Citoyenne (ECSA), ainsi que par des e-mails directs aux projets de sciences participatives que nous pouvions identifier *via* les points de contact nationaux de l'EJP SOIL mais qui n'avaient pas répondu rapidement. Le questionnaire a été mis en ligne avec le logiciel « Askallo GmbH (2022) (Version 2022.6) ». Après un prétest sur 11 personnes et de nouvelles adaptations, le questionnaire a été lancé en juin 2022 et est resté actif pendant 4 mois, jusqu'en octobre 2022.

2.2 Traitement et analyse des données

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec R version 4.2.2 (R Core Team, 2022). Pour créer la *Figure 1*, le package R tidyverse (v2.0.0 ; Wickham *et al*., 2019) a été utilisé. Les *Figures 2 à 6* illustrent les fréquences des réponses calculées, et ont été créées à l'aide du package R « ggplot2 » (v3.4.2 ; Wickham, 2016). La *Figure 7* illustre les médianes des évaluations des prérequis fournies par les coordinateurs et les novices. Le test de Friedman a été utilisé pour évaluer les différences dans l'importance perçue de divers prérequis au sein de leurs projets par les coordinateurs et les novices. D'autres comparaisons par paires utilisant le package « pgirmess » (v2.0.2, Giraudoux, 2023) ont révélé des distinctions statistiquement significatives. Le test de Mann—Whitney U a été utilisé pour analyser s'il y avait des différences significatives dans la perception des coordinateurs et des novices concernant l'importance des différents prérequis.

3. RÉSULTATS

3.1. Répondants à l'enquête

Un total de 106 consultations de notre enquête a été enregistré, dont 58 enquêtes complètes et 48 enquêtes incomplètes. Deux projets ont été éliminés, laissant 56 questionnaires pour l'analyse. La plupart des répondants (n = 56) étaient membres d'un institut de recherche (59 %) ou d'une université (21 %). Certains étaient issus d'entreprises (4 %), d'ONG (4 %) ou de bureaux administratifs gouvernementaux (5 %). Pratiquement tous les répondants ont indiqué être familiers avec le concept de sciences participatives ; un seul répondant n'en avait jamais entendu parler. Moins de la moitié des répondants (43 %) ont déclaré avoir déjà participé ou (co-)organisé un projet de sciences participatives : ceux-ci sont définis comme des coordinateurs. L'autre partie des répondants, qualifiée de novices, n'a jamais participé à un tel projet ni contribué à son organisation (57 %).

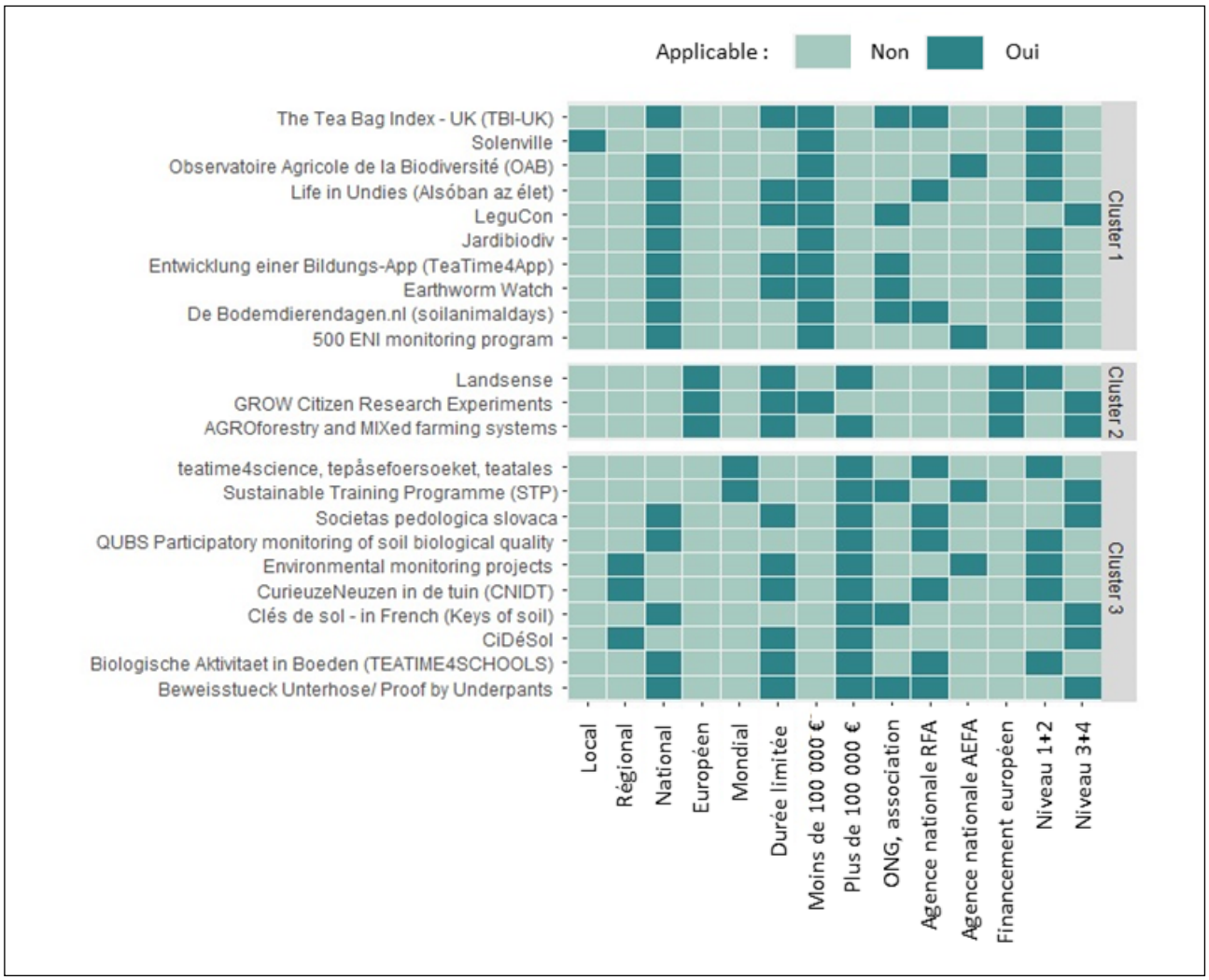
3.2. Description des projets de sciences participatives

Les projets de sciences participatives rapportés présentaient diverses caractéristiques. Environ 90 % d'entre eux concernaient des pays d'Europe occidentale (France, Royaume-Uni, Belgique, Pays-Bas et Irlande) (n = 24). Les projets à l'échelle nationale représentaient 63 %, les projets à l'échelle locale ou régionale 17 %, et seulement 13 % des projets couvraient l'ensemble de l'Europe. Le budget des projets (n = 24) variait ; 25 % avaient un budget inférieur à 50 000 €, 45 % avaient un budget compris entre 50 000 € et 500 000 € et 30 % avaient un budget supérieur à 500 000 €. Les projets étaient principalement financés par des agences nationales de financement de la recherche (42 %), suivies par une fondation/ONG/association (33 %) et des agences nationales de financement agricole ou environnemental (17 %). La plupart des projets étaient de courte durée, environ 60 % d'entre eux ayant duré moins de 3 ans. La durée de projet la plus courte était de 6 mois et la plus longue de 140 mois (=11,5 ans). La durée moyenne du projet était de 46 mois et la médiane de 29 mois (n = 20). La raison invoquée pour la fin du projet était la fin du financement (87 %) ou l'atteinte des objectifs scientifiques (27 %). Selon les coordinateurs de projets (n = 24), la plupart des projets de sciences participatives ont utilisé une approche de crowdsourcing, dans laquelle les citoyens contribuaient uniquement à la collecte de données sur les sols. Près de 30 % des activités participatives des projets allaient plus loin, c'est-à-dire que les citoyens contribuaient non seulement à la collecte des données, mais aussi à la définition des questions de recherche. Les citoyens impliqués dans ces projets étaient des agriculteurs, des étudiants, des enseignants, et des jardiniers.

Parmi l'ensemble des projets de sciences participatives mentionnés, 23 ont été nommément cités par les coordinateurs. Ces projets se répartissent en trois groupes distincts *(Figure 1)*, en fonction des caractéristiques suivantes : (i) l'étendue géographique du projet, allant de local à régional, national, européen et mondial ; (ii) la durée du projet, c'est-à-dire limitée ou non ; (iii) le budget du projet, catégorisé en « inférieur à 100 000 € » ou « supérieur à 100 000 € » ; (iv) la source de financement du projet, incluant des catégories telles que « fondation/ONG/association », « agence nationale de financement de la recherche (RFA) », « agence nationale de financement agricole ou environnemental (AEFA) » ou « financement européen » ; (v) le niveau des activités de sciences participatives envisagées par les coordinateurs de projets, catégorisé en deux niveaux (niveau 1 + 2, qui inclut le « crowdsourcing » et l'« intelligence distribuée », et niveau 3 + 4, qui inclut la « science participative » et la « science participative extrême »). Le Cluster 1 était composé de « Projets nationaux à faible budget avec une approche de crowdsourcing ». La plupart des projets de ce cluster étaient à l'échelle nationale (un seul était local). Aucun projet n'avait une portée régionale,

Figure 1 : Description des projets de sciences participatives mentionnés (n = 23), telle que rapportée par les coordinateurs (d'après Mason *et al*., 2024).

Figure 1: *Description of the named citizen science project (n=23) as reported by coordinators (from Mason et al., 2024).*



européenne ou mondiale dans ce cluster. Tous les projets avaient un budget inférieur à 100 000 €. Aucun projet n'a reçu de financement provenant de sources européennes. Des associations d'ONG ou des sources de financement nationales étaient impliquées. La plupart des projets appartenaient à la catégorie « crowdsourcing ». Le Cluster 2, « Projets européens à durée limitée », était exclusivement composé de projets à l'échelle européenne. Tous les projets avaient une durée limitée, avec des budgets à la fois inférieurs et supérieurs à 100 000 €. Tous ont reçu un financement provenant de sources européennes. Un projet est tombé dans le niveau 1 « crowdsourcing », tandis que deux projets sont tombés dans le niveau 3 « science participative ». Le Cluster 3, « Projets régionaux et nationaux à budget élevé », n'incluait aucun projet local ou européen. Six projets avaient une durée limitée, tandis que quatre avaient une durée non spécifiée, suggérant des projets à durée potentiellement illimitée. Tous les budgets dépassaient 100 000 €. Aucun financement européen n'était impliqué, les principales sources de financement provenaient d'associations d'ONG et d'agences nationales de financement de la recherche. Le Cluster 3 présentait une distribution égale des projets à travers différents niveaux. La moitié des projets étaient classés dans le niveau 1 + 2, qui inclut le « crowdsourcing » et l'« intelligence distribuée », tandis que l'autre moitié était classée dans le niveau 3 + 4, qui inclut la « science participative » et la « science participative extrême ».

Plus de 66 % des projets (n = 24) ont généré des données sur la biodiversité des sols. Ces projets comprenaient, par exemple, Earthworm Watch, Teatime4schools et Proof by Underpants, qui

utilisaient des enquêtes sur les vers de terre, la décomposition de sachets de thé et les micro-organismes entrant dans les sachets de thé, ainsi que la décomposition de slips pour mesurer la biodiversité, respectivement. Environ 54 % et 42 % ont généré des données sur la couverture végétale et le carbone organique du sol, respectivement *(Figure 2)*. Plus de la moitié des projets portaient sur le jardinage urbain (58 %), les terres cultivées (42 %), les fruits et légumes ou les prairies (33 %), l'arboriculture et les vignobles (21 %).

3.3. Application des 10 principes de sciences participatives

Cette analyse a été réalisée sur la base des réponses des coordinateurs de projets de sciences participatives et des 10 principes *(Tableau 1)*.

3.3.1. Participation aux projets de sciences participatives

Le premier principe de sciences participatives tel que défini par l'ECSA (ECSA, 2015) est l'implication des citoyens dans une démarche scientifique qui génère de nouvelles connaissances ou compréhensions pour eux. Dans cette revue (n = 24), les citoyens étaient principalement impliqués dans les projets en tant que contributeurs de données (88 %), collaborateurs (50 %) ou (co-)leaders de projet (13 %). En ce qui concerne les tâches du projet, les citoyens participaient à différentes étapes du processus scientifique (quatrième principe) (*Figure 3*, n = 24). Ils se concentraient principalement sur la collecte de données et d'échantillons (92 %), tandis que les principales tâches des coordinateurs de projet étaient la demande de financement (88 %), l'élaboration du plan d'étude, la publication des résultats et la planification de la logistique (toutes trois à 79 %). L'interprétation des résultats (88 %), l'analyse des données (88 %) et la recherche bibliographique (88 %) ainsi que la conception de l'étude (83 %) concernaient principalement les scientifiques. Ainsi, les différentes tâches des projets n'étaient généralement pas réparties de manière égale *(Figure 3)*.

Le troisième principe des sciences participatives *(Figure 4)* (n = 24) illustre les bénéfices pour les citoyens prenant part aux projets, ce qui, dans notre revue, a été rapporté par les coordinateurs et allait des opportunités d'apprentissage (91 %) et de satisfaction liée à la contribution aux preuves scientifiques (83 %), à la publication des résultats de la recherche (21 %). Les avantages rapportés pour les scientifiques comprenaient des opportunités d'apprentissage (79 %), le plaisir personnel et la publication des résultats de recherche (tous deux à 67 %), et la possibilité d'influencer la politique (54 %).

Le cinquième principe est le retour d'information que les citoyens reçoivent du projet (ECSA, 2015). Plus de 75 % des citoyens (n = 24) ont reçu des retours via la page web du projet, et plus de 58 % via des bulletins d'information. Le soutien personnel, les ateliers et Facebook ont été mentionnés respectivement par 54 %, 50 % et 50 % des projets.

Figure 2 : Données sur la santé des sols générées par les projets de sciences participatives (n = 24) (d'après Mason *et al.,* 2024).
Figure 2: *Soil health data generated by the citizen science projects (n=24) (from Mason et al., 2024).*

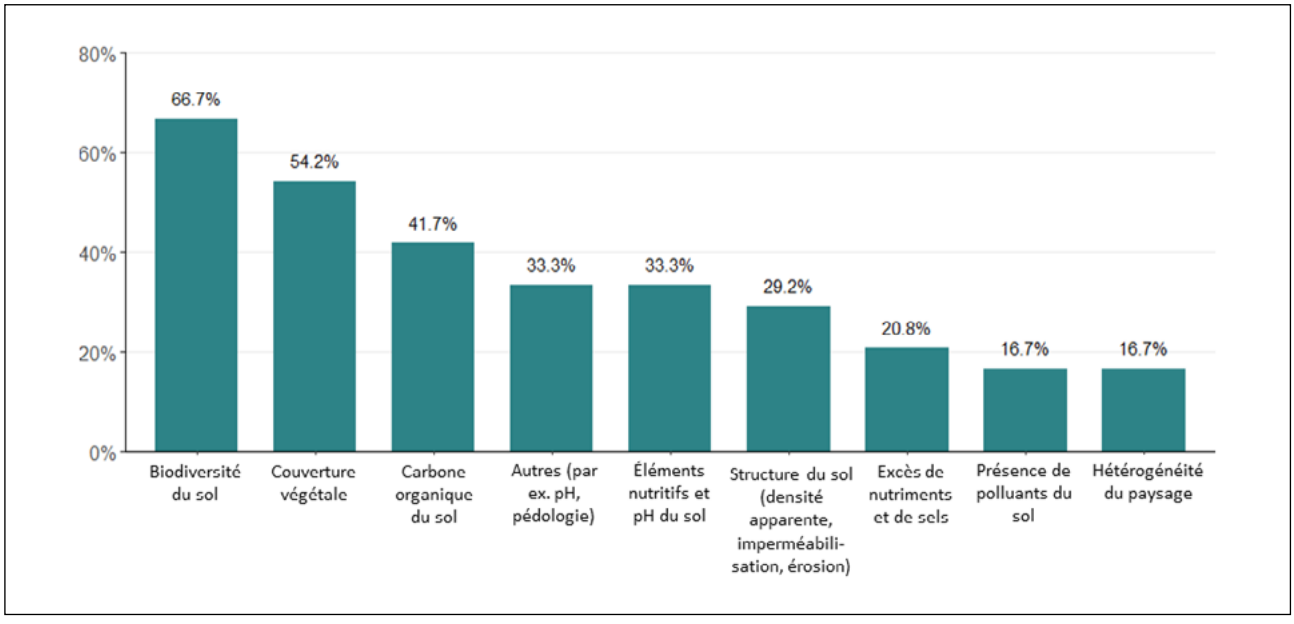
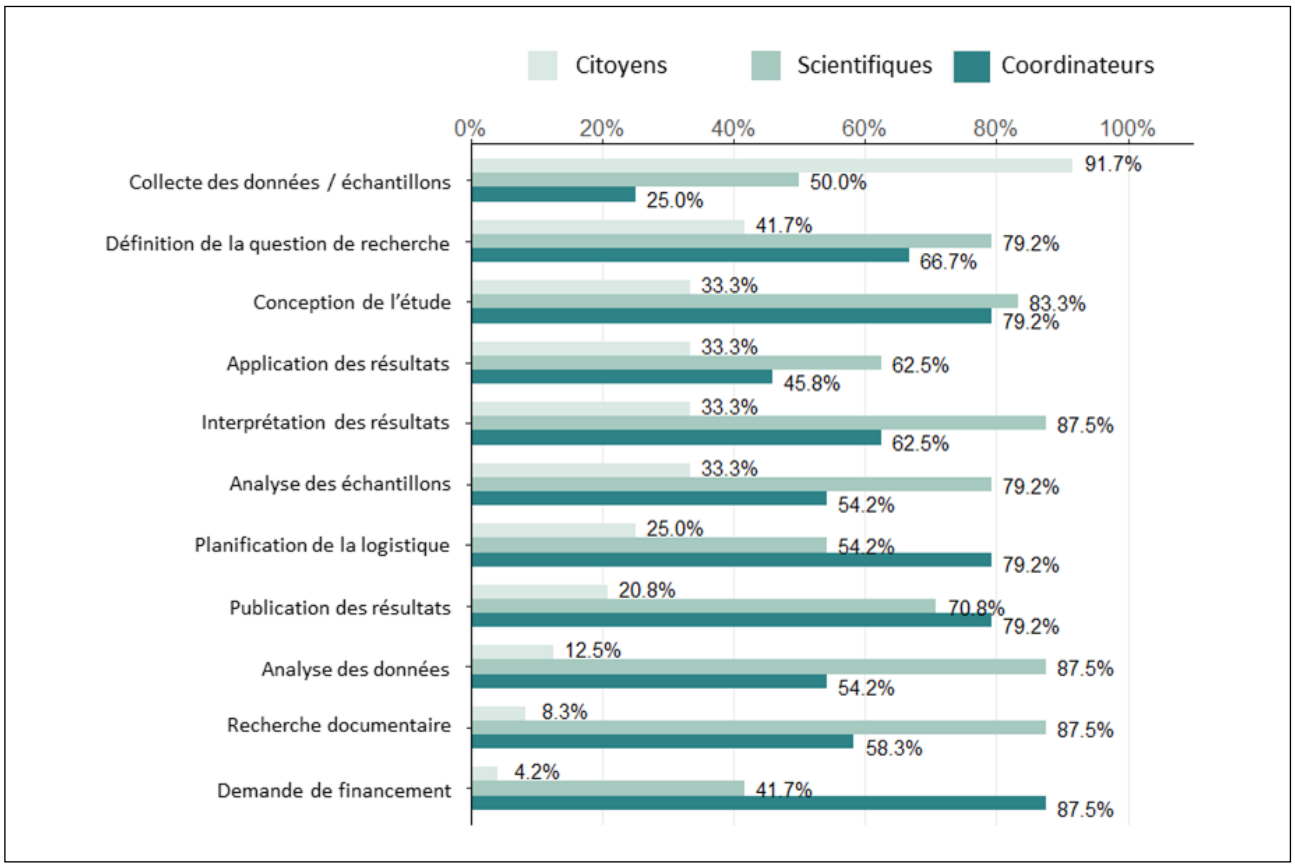


Figure 3 : Tâches réalisées par les citoyens, les coordinateurs et les scientifiques dans les projets de sciences participatives (n=24) (d'après Mason *et al*., 2024).
***Figure 3**: The tasks of citizen scientists, project coordinators and scientists in the citizen science projects (n=24) (from Mason et al., 2024).*



Dans la majorité des projets (86 %, n = 28), les citoyens ont été remerciés dans les résultats et les publications du projet, conformément au huitième principe des sciences participatives (ECSA, 2015). Ces remerciements ont pris diverses formes : envoi de courriels aux participants, organisation d'ateliers, mention dans des articles scientifiques, sur des sites internet ou dans d'autres publications. Un répondant a également mentionné que des étudiants sélectionnés avaient été intégrés comme coauteurs d'articles. La principale raison invoquée pour l'absence de remerciement des citoyens était que les résultats n'avaient pas encore été publiés. Le remerciement était prévu une fois les résultats disponibles.

3.3.2. Ouverture des projets de sciences participatives

Le septième principe des sciences participatives stipule que les données et les métadonnées des projets doivent être mises à disposition du public et, dans la mesure du possible, les résultats doivent être publiés en accès libre (ECSA, 2015). La plupart des projets (58 %, n = 12) ont publié leurs résultats et métadonnées en accès libre ; les projets restants qui n'avaient pas encore été publiés en accès libre ont indiqué qu'ils prévoyaient de le faire. La plupart des résultats des projets (n = 24) ont été publiés sur des sites web (79 %), dans des rapports (75 %), sur les réseaux sociaux (58 %) et dans des revues scientifiques évaluées par des pairs (38 %). Les flyers, la radio et la télévision ont été moins souvent utilisés pour la diffusion des résultats (33 %, 29 % et 25 %, respectivement). Les coordinateurs ont exprimé l'intention de publier dans des revues scientifiques évaluées par des pairs pour 58 % des projets. Certaines des données de recherche et métadonnées des projets ont été intégrées dans d'autres bases de données (nationales ou d'infrastructure de recherche). Les bases de données les plus rapportées étaient la base de données du Tea Bag Index (www.teatime4science.org), la base de données SoilTemp (www.soiltempproject.com), Jardibiodiv et INDORES.

Le dixième principe stipule que les coordinateurs des projets de sciences participatives prennent en considération les questions juridiques et éthiques liées au droit d'auteur, à la propriété intellectuelle, aux accords de partage des données,

Figure 4 : Bénéfices pour les scientifiques et les citoyens issus de leur participation à des projets de sciences participatives (n=24) (d'après Mason *et al.*, 2024).

Figure 4: *Benefits for scientists and citizen scientists in taking part in citizen science projects (n=24) (from Mason et al., 2024).*

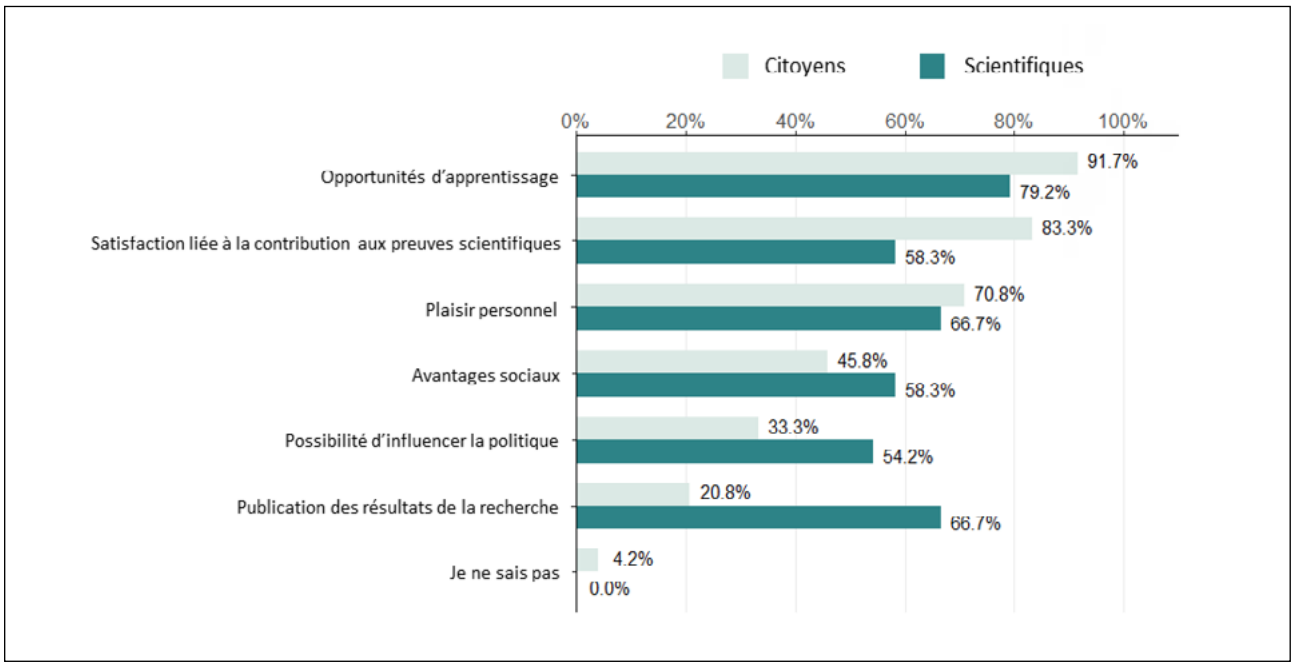
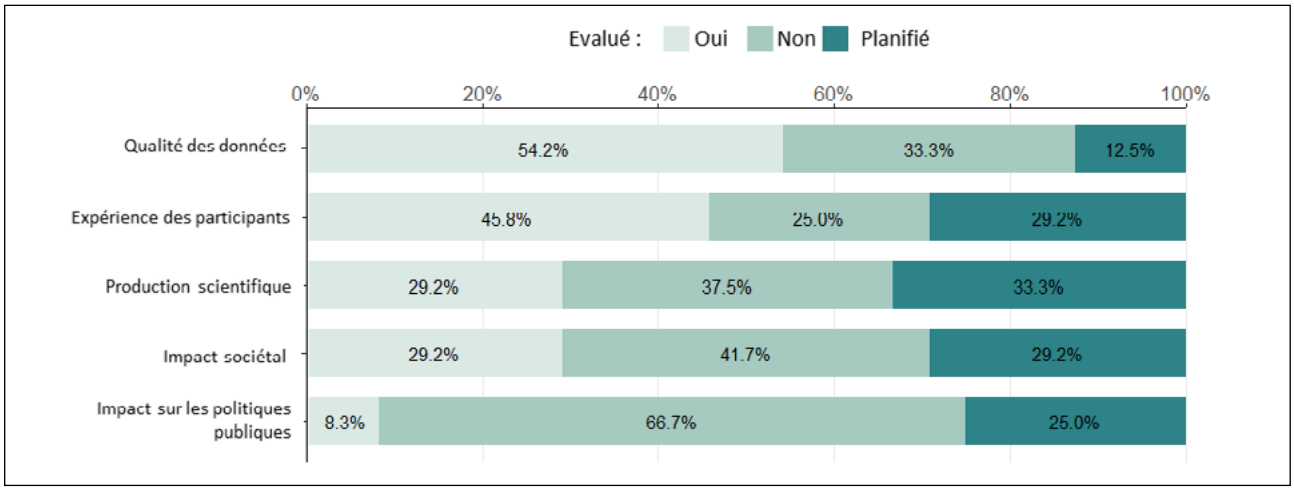


Figure 5 : Évaluation des projets de sciences participatives, telle que rapportée par les coordinateurs (n=24) (d'après Mason *et al.*, 2024).

Figure 5: *Reported evaluation of the citizen science projects by the coordinators (n=24) (from Mason et al., 2024).*

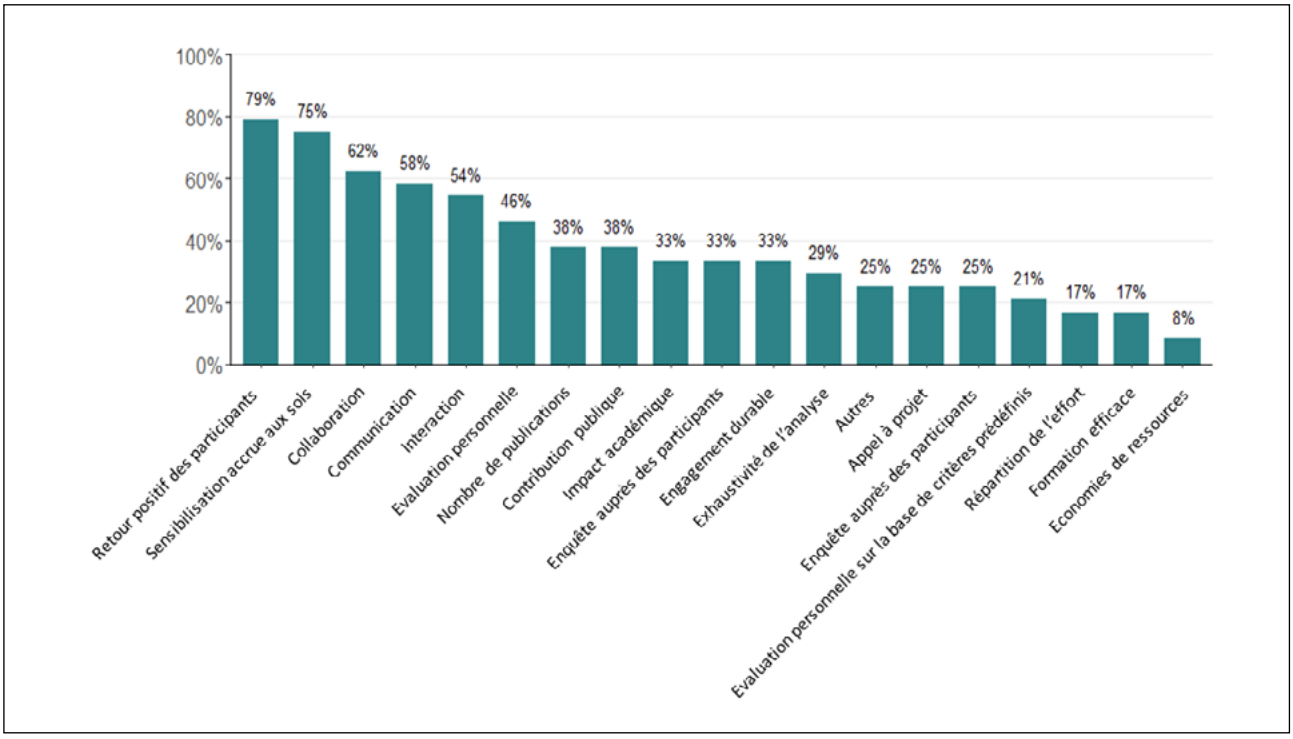


à la confidentialité, à l'attribution et à l'impact environnemental des activités (ECSA, 2015). La plupart des projets rapportés (n = 24) ont pris en compte la confidentialité (92 %), la propriété intellectuelle (83 %), les accords de partage des données (79 %) et l'impact environnemental (79 %).

3.3.3. Efficacité des projets de sciences participatives

Le deuxième principe des sciences participatives stipule qu'un projet doit produire un véritable résultat scientifique (ECSA, 2015). Parmi les résultats scientifiques rapportés dans les projets étudiés, on peut citer la réponse à des questions de recherche telles que l'impact de l'imperméabilisation des sols sur leur fonctionnement, ou encore la cartographie des sols

Figure 6 : Modes d'évaluation du succès des projets par les coordinateurs (n=24) (d'après Mason *et al*., 2024).
Figure 6: *Reported ways to indicate the success of a project (n=24) (from Mason et al., 2024).*



dégradés et de la qualité des sols à des fins de gestion ou de prise de décision politique.

Les sciences participatives sont considérées comme une approche de recherche à part entière, avec des limites et des biais qui doivent être pris en compte et maîtrisés (sixième principe des sciences participatives ; ECSA, 2015). Dans notre étude, les coordinateurs ont identifié « projet très chronophage » et « financement temporaire » comme les principaux défis de recherche pour les projets (n = 24).

Le neuvième principe précise que les projets doivent être évalués selon leur production scientifique, la qualité des données, l'expérience des participants ainsi que leur impact sociétal ou politique plus large (ECSA, 2015). Dans notre revue, environ la moitié des projets ont été évalués en matière de qualité des données (54 %, n = 24 ; *Figure 5*), mais moins en ce qui concerne l'expérience des participants (46 %), la production scientifique et l'impact sociétal (les deux 29 %). Moins de 8 % des projets avaient été évalués pour leur impact sur les politiques publiques. Les coordinateurs de sciences participatives ont souligné que la qualité des données était rigoureusement contrôlée par des experts (chercheurs, équipes thématiques ou techniciens spécialisés).

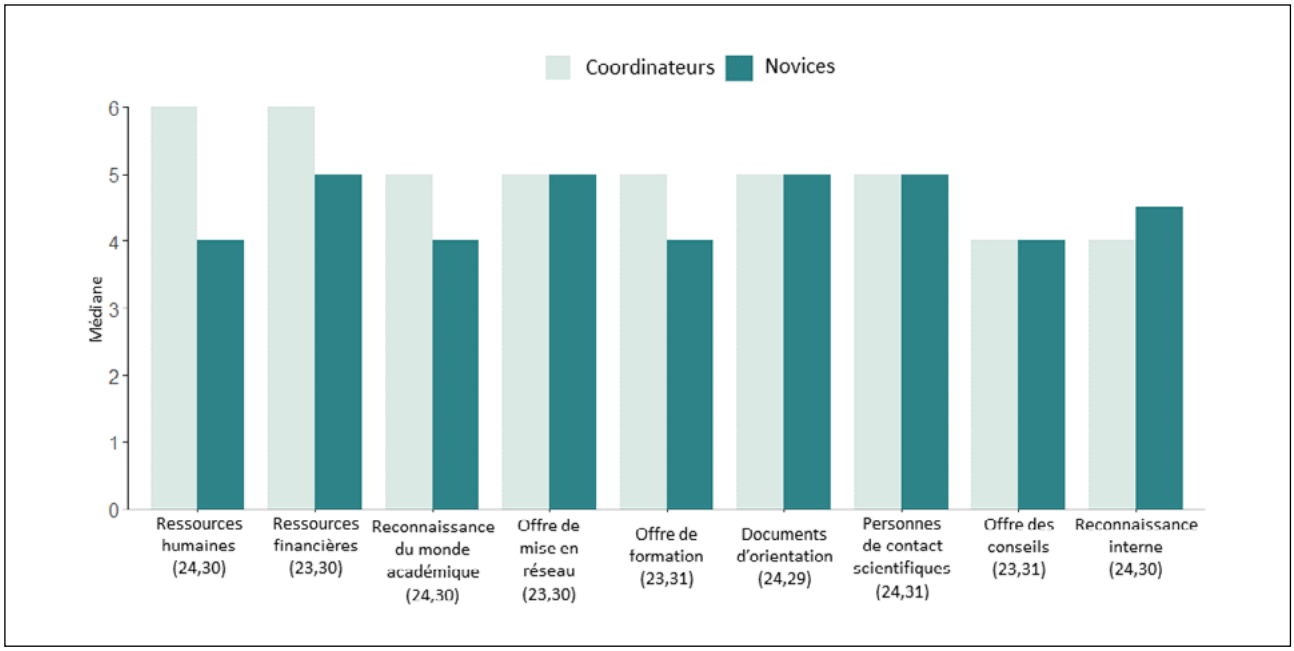
3.4. Comment exploiter le potentiel des sciences participatives ?

Notre étude a révélé la manière dont les coordinateurs de projets de sciences participatives ont évalué la réussite de leur projet (n = 24 ; *Figure 6*). Les retours positifs des participants (79 %), l'augmentation de la prise de conscience du sol parmi les citoyens participants (75 %) et la collaboration (63 %) étaient les principaux indicateurs de réussite identifiés.

Les coordinateurs et les novices en sciences participatives ont évalué les facteurs clés proposés pour la réussite des projets, sur une échelle de 1 à 6, où 1 correspond à "pas important" et 6 à "très important" *(Figure 7)*. Les coordinateurs (n = 24) ont indiqué que "plus de ressources humaines" était le facteur clé le plus important (médiane = 6), suivi de "plus de ressources financières" (médiane = 6) et "meilleure reconnaissance des sciences participatives dans le monde académique " (médiane = 5). Les novices (n = 31) ont identifié "plus de ressources financières" comme le facteur clé le plus important (médiane = 5). "Des documents d'orientation" ont également été mentionnés comme un facteur clé important (médiane = 5). Tous les facteurs clés listés dans notre enquête ont été mentionnés comme nécessaires (ou souhaités). Parmi les coordinateurs, il y a eu une différence significative dans la perception de l'importance des différentes conditions préalables ($p < 0,0001$). Des comparaisons par paires supplémentaires ont

Figure 7 : Facteurs clés (score médian sur une échelle de 1 à 6) pour la réussite des projets (n indiquant le nombre de répondants) (d'après Mason *et al.*, 2024).

Figure 7: *Important prerequisites (median score on a scale 1 to 6) reported for coordinators' citizen science work and for citizen science novices to conduct a citizen science project in the future (n indicates the number of respondents) (from Mason et al., 2024).*



révélé des différences statistiquement significatives, notamment entre les ressources humaines et l'orientation (p = 0,017), les ressources humaines et la reconnaissance interne (p = 0,001), les ressources financières et l'orientation (pv= 0,023), ainsi qu'entre les ressources financières et la reconnaissance interne (p = 0,002). Parmi les novices, aucune différence significative n'a été détectée dans ces conditions préalables. Dans l'analyse des conditions préalables, il a été constaté que les coordinateurs et les novices présentaient des différences significatives dans leurs perceptions de l'importance des ressources humaines (p < 0,001) et des ressources financières (p = 0,015) à l'aide du test U de Mann-Whitney.

Les novices ont également partagé leurs suggestions pour améliorer les sciences participatives en Europe. De manière générale, ils ont souligné l'intérêt d'une cartographie européenne des initiatives en sciences participatives sur les sols, qui pourrait servir de point de départ pour l'échange d'expériences et de bonnes pratiques. Ils ont également exprimé le besoin de disposer de données ouvertes accessibles, ainsi que de renforcer la coopération. Concernant les réseaux de sciences participatives sur les sols, les novices ont exprimé un fort intérêt pour une amélioration de la collaboration entre pays. Ils ont exprimé le besoin d'harmoniser les méthodes et de partager les approches et les résultats. Ils souhaitent la mise en place d'un réseau pérenne et autonome.

4. DISCUSSION

4.1. Les sciences participatives européennes dans une perspective de santé des sols

Les projets de science des sols réalisés en collaboration avec les citoyens peuvent contribuer à la protection et à l'amélioration de la santé des sols (Head *et al.*, 2020). Le développement des sciences participatives a été accompagné par une augmentation des projets de sciences participatives sur les sols (Ranjard, 2020 ; Ranjard *et al.*, 2022), comme en témoignent les 24 projets passés en revue ici. Nous avons consacré cette revue aux projets menés en Europe, car le programme EJP SOIL est européen. Parmi les 24 projets rapportés, 63 % étaient des projets à l'échelle nationale et 13 % couvraient l'ensemble de l'Europe. Pour diffuser notre enquête au-delà d'EJP SOIL, nous avons utilisé les points focaux de chaque pays du consortium EJP SOIL. Ces derniers ont diffusé l'enquête dans leurs pays. De plus, notre revue s'est concentrée sur les sols agricoles, et les projets de sciences participatives portant sur d'autres types de sols, tels que ceux forestiers, n'ont pas été collectés, limitant ainsi le nombre de projets traités. Les projets de sciences participatives sur les sols agricoles sont rares par rapport à ceux de la communauté plus large des sciences participatives (Ryan *et al.*, 2018). Parmi les 23 projets que nous avons identifiés, trois groupes se sont dégagés : (i) des projets nationaux à faible budget

avec une approche de crowdsourcing, (ii) des projets européens à durée limitée et (iii) des projets régionaux et nationaux à budget élevé. Pino *et al.* (2022) ont également récemment passé en revue des projets de sciences participatives sur les sols. Ils ont identifié trois grandes tendances : (i) des projets liant les sols à la santé humaine, tels que ceux portant sur le plomb ou des sols sains pour l'alimentation ; (ii) des projets axés sur la sensibilisation et l'éducation ; (iii) des projets axés sur la santé des sols et la productivité, tels que ceux conçus pour lutter contre la dégradation des sols et améliorer la productivité agricole. Pour les sols agricoles, les projets que nous avons examinés se concentraient principalement sur les deux dernières catégories. Tous répondaient à ces deux tendances, à savoir éduquer et améliorer la santé des sols.

Les sols, comparés à l'eau et à l'air, sont encore peu surveillés par les citoyens, principalement en raison du manque de financement pour la surveillance des sols (Fraisl *et al*., 2020 ; Head *et al*., 2020). Néanmoins, les sciences participatives jouent un rôle clé dans la surveillance de la santé des sols (Head *et al*., 2020). La plupart des projets que nous avons examinés ont généré des données sur la biodiversité des sols *(Figure 2).* Head *et al.* (2020) et Ranjard *et al.* (2022) ont observé une tendance similaire. Il est relativement facile pour les citoyens d'observer certains organismes tels que les vers de terre, qui sont relativement grands et simples à trouver et à observer sans équipement spécial, ce qui fait des vers de terre un sujet idéal pour les projets (Burton et Cameron, 2021 ; Pocock *et al*., 2018). Notre analyse a révélé la disponibilité de méthodes de sciences participatives et kits d'outils adaptés aux sciences participatives pour le suivi de différents aspects de la biodiversité des sols. D'autres données sur la santé des sols relevées dans notre étude concernent la couverture végétale et le carbone organique du sol, qui sont également liés aux enjeux de biodiversité. L'Observatoire Européen des Sols (EUSO) a mis en place un tableau de bord complet contenant des indicateurs présentant des données sur des questions liées aux sols telles que l'érosion des sols, la biodiversité des sols, le carbone du sol, les polluants, les nutriments du sol, etc. (Panagos *et al*., 2022). Les sciences participatives présentent un potentiel considérable pour collecter une large gamme de données localisées, pouvant contribuer utilement aux travaux de l'EUSO (Schillaci *et al*., 2022).

4.2. Respect des principes des sciences participatives

4.2.1. Participation aux projets de sciences participatives

Notre analyse des réponses des coordinateurs a montré que les projets de sciences participatives respectaient largement les 10 principes des sciences participatives. Les citoyens ont participé à différentes étapes du processus scientifique, mais principalement en tant que contributeurs de données (88 %) dans les projets (1er et 4e principes ; ECSA, 2015), comme l'ont également observé Turrini *et al.* (2018). À ce jour, la méthode dominante pour engager les citoyens dans la recherche scientifique a été la méthode "contributive", où les citoyens collectent et soumettent principalement des données observationnelles (Phillips *et al*., 2019). Dans notre revue, 13 % des projets ont impliqué des citoyens en tant que chefs de projet (co-leaders). La communauté des sciences participatives commence à explorer et adopter des méthodes "collaboratives" et "co-créatives", où les citoyens sont non seulement impliqués dans la collecte de données, mais aussi dans la conception des projets, l'analyse des données et le développement des questions de recherche (Robinson *et al*., 2018). Plusieurs avantages émergent de l'implication plus profonde des citoyens dans la recherche scientifique, tels que des opportunités d'apprentissage pour les citoyens, une confiance accrue dans la recherche et des résultats de recherche plus efficaces (Bonney *et al*., 2016 ; Trimble et Berkes, 2013). Cela appelle à une participation accrue des citoyens tout au long du processus de recherche.

Les opportunités d'apprentissage ont été le principal avantage rapporté pour les citoyens (91 %) et les scientifiques (79 %) (3e principe ; ECSA, 2015) dans notre revue. Diverses études ont souligné les résultats d'apprentissage, notamment le comportement, la motivation et l'efficacité personnelle, qui résultent de l'engagement des citoyens dans les sciences participatives (Phillips *et al*., 2018 ; Schuttler *et al*., 2018). Participer à de tels projets peut contribuer à acquérir de nouvelles connaissances et compétences ainsi qu'à augmenter la culture scientifique et environnementale (Forrester *et al*., 2017 ; Turrini *et al*., 2018). Cela est particulièrement important étant donné que, jusqu'à présent, les sols ont été largement invisibles pour une grande partie de la population (Frelih-Larsen *et al*., 2018). Pour renforcer davantage les opportunités d'apprentissage, Roche *et al.* (2020) ont suggéré qu'avant de lancer un projet de sciences participatives, les coordinateurs des projets de sciences participatives prennent le temps d'aligner les objectifs pédagogiques avec les finalités du projet, selon une approche de co-création. Fournir un retour d'information sur le projet aux citoyens (5e principe ; ECSA, 2015) pourrait également être un moyen de contribuer aux opportunités d'apprentissage des citoyens. Un bon retour d'information présente de multiples avantages, notamment en encourageant une participation accrue (Robinson *et al*., 2018). Une autre manière de montrer aux citoyens que leur contribution est reconnue consiste à les mentionner dans les résultats et publications du projet (8e principe ; ECSA, 2015). Dans la plupart des projets rapportés ici (83 %), les citoyens ont été remerciés dans les résultats et

publications. Par exemple, Daebeler *et al.* (2022) ont intégré des lycéens comme coauteurs dans une publication scientifique, en reconnaissance de leur participation active et de leurs apports scientifiques.

4.2.2. L'ouverture des projets de sciences participatives

Les 7e et 10e principes des sciences participatives concernent le partage des données (ECSA, 2015). Dans notre revue, tous les projets rapportés soit avaient leurs résultats et métadonnées publiés en accès libre, soit prévoyaient de le faire. Les projets avec des données ouvertes au public permettent aux participants d'utiliser les données collectées dans le projet à leur propre bénéfice, tout en mettant les résultats du projet à la disposition du public intéressé et de la communauté scientifique. Cela augmente le potentiel de bénéficier à la société par l'utilisation et la réutilisation des données collectées dans un autre projet de recherche (Cooper *et al.*, 2021). Par conséquent, l'ouverture est essentielle dans les projets de sciences participatives (Albert *et al.*, 2021 ; Heigl *et al.*, 2019). Les autorités publiques ont mis en place des politiques de données ouvertes pour rendre disponibles de grandes quantités d'informations à tous ceux qui souhaitent les consulter, les traiter et les analyser (Mazumdar *et al.*, 2018). La plupart des projets rapportés ici ont pris en compte des accords de partage des données (79 %). Au niveau européen, la publication en libre accès est déjà une exigence dans le cadre d'Horizon 2020 et d'Horizon Europe, les programmes de financement de la recherche et de l'innovation de l'UE pour 2014-2020 et 2021-2027 respectivement (European Commission, 2016, 2017 ; European Commission, 2021b). Cependant, l'accès ouvert n'est pas toujours une exigence systématique pour les projets financés au niveau national ou régional. En effet, de nombreux projets de ce type ne sont pas des projets de l'UE et ne sont pas encore tenus de publier en accès libre. Néanmoins, les sciences participatives soutiennent la science ouverte et de nombreuses ressources sont disponibles pour les coordinateurs de projets sur ce sujet au sein de la communauté des sciences participatives plus large. Cela inclut le groupe de travail sur les sciences participatives et la science ouverte de l'Association européenne des sciences participatives (www.ecsa.ngo/working-groups/citizen-science-and-open-science). Dans cette optique, Fantappiè *et al.* (2021) ont récemment élaboré un projet d'accord amélioré pour le partage des données sur les sols entre les partenaires d'EJP SOIL et le European Soil Data Centre, qui pourrait également être utilisé dans des projets de sciences participatives. Cet accord comprenait une liste de bonnes pratiques recommandées.

Quelques défis subsistent toutefois pour la mise en œuvre de la science ouverte. Premièrement, les projets de sciences participatives doivent garantir la protection de la vie privée des participants, en les informant des risques potentiels et en mettant en place des mesures de sécurité appropriées (Bowser *et al.*, 2014). Une attention rigoureuse à la protection des données est indispensable. Le respect des législations sur la protection des données, comme le Règlement général sur la protection des données (RGPD), est une obligation légale (Pierce et Evram, 2022). Deuxièmement, rendre les données accessibles au public implique des coûts supplémentaires, tels que les frais de publication en libre accès ou ceux liés à la maintenance d'un site web dédié à la présentation des résultats et des métadonnées du projet. Enfin, la question de savoir si les données accessibles au public peuvent être réutilisées sans consentement explicite des citoyens reste sujette à débat. Il existe une contradiction claire entre les idéaux d'ouverture et d'accessibilité encouragés par les sciences participatives et la protection des données des participants (Suman et Pierce, 2018).

4.2.3. L'efficacité des projets de sciences participatives

Les projets de sciences participatives constituent un outil important pour engager le public dans la recherche scientifique et pour accroître la culture scientifique (Bonney *et al.*, 2009). Ces projets ont montré des effets positifs sur la science, la société, l'économie, l'environnement et les participants individuels (Heigl *et al.*, 2019 ; Somerwill et Wehn, 2022). Les résultats scientifiques de ces projets ont été rapportés dans notre revue (2e principe ; ECSA, 2015) : 58 % des connaissances nouvellement générées étaient prévues pour être publiées dans des revues scientifiques évaluées par des pairs. Le nombre de publications évaluées par des pairs issues des projets de sciences participatives croît rapidement d'année en année (Follett et Strezov, 2015 ; Pocock *et al.*, 2017). La même tendance est observée pour les projets de sciences participatives liés aux sols. Lorsqu'on croise les mots-clés « soil » et « citizen science » dans le Web of Science (consulté le 7 mars 2023), les deux tiers des 191 publications répertoriées ont été publiées au cours des deux dernières années. Le succès des projets de sciences participatives dépend fortement de la capacité à atteindre et maximiser les résultats scientifiques. Sans résultats scientifiques significatifs, la confiance des citoyens dans le projet et la motivation à participer peuvent diminuer (Robinson *et al.*, 2018).

Malgré le potentiel des projets de sciences participatives, leur impact est souvent difficile à mesurer et à évaluer. Dans de nombreux cas, une telle évaluation ne parvient pas à saisir toute l'étendue de l'impact positif des sciences participatives en raison de ressources limitées pour l'évaluation. Afin de garantir que les projets sont efficaces, ils doivent être évalués en matière de production scientifique, de qualité des données, d'expérience des participants et d'impact sociétal ou politique (9e principe ; ECSA, 2015). Récemment, le nombre d'articles scientifiques et de demandes d'évaluation de l'impact des projets de sciences participatives a augmenté (Schaefer *et al.*, 2021). Par exemple, le

projet MICS a développé un outil de pointe pour évaluer l'impact dans cinq domaines : la société, l'environnement, l'économie, la gouvernance et la science et la technologie (Wehn *et al*., 2021). Dans notre revue, 29 % et 8 % des projets rapportés ont été évalués pour leur impact sociétal et politique respectivement, tandis qu'une forte demande de preuve de l'impact sociétal et politique des pratiques de sciences participatives existe dans certains pays, par exemple en Allemagne (Perelló *et al*., 2021). Ces auteurs s'attendent à ce que cette demande s'étende à d'autres pays à l'avenir. Les impacts sociétaux et politiques sont aussi cruciaux que la production scientifique et l'expérience des participants, car les projets de sciences participatives pourraient apporter une contribution notable à l'élaboration et à la mise en œuvre de politiques (Nascimento *et al*., 2018). Par exemple, le projet de sciences participatives sur les tendances de la biomasse des insectes en Allemagne (Hallmann *et al*., 2017) a conduit à l'adoption de la nouvelle loi allemande sur la protection des insectes (BMUV, 2019). Dans un autre exemple, au Ghana, les données sur les déchets sur les plages issues d'un projet de sciences participatives ont été intégrées dans la surveillance officielle d'un indicateur des ODD (Objectifs de développement durable) (Fraisl *et al*., 2022). Selon Von Gönner *et al.* (2023), les coordinateurs de projets de sciences participatives devraient s'efforcer d'avoir un impact sur la société et la politique en s'engageant avec les décideurs dès le début et en veillant à ce que leurs plans soient alignés avec les processus politiques en cours. L'impact sur la qualité des données, cependant, a été mesuré plus fréquemment et plus facilement. Environ la moitié des projets rapportés ont été évalués en matière de qualité des données, ce qui montre qu'il reste encore des marges de progrès avant que les données puissent être facilement intégrées dans des bases de données existantes (INSPIRE, 2013). Les sols sont encore souvent mal connus, ce qui rend les mesures de haute qualité difficiles. Cela rend l'expertise particulièrement importante. Dans notre revue, il a été rapporté que la qualité des données était strictement contrôlée par des experts (scientifiques, équipes thématiques ou techniciens spécialisés). Garantir la qualité des données dans un projet de sciences participatives améliore la réputation du projet (Balázs *et al*., 2021). Les ensembles de données produits par les citoyens peuvent être de très haute qualité (Kosmala *et al*., 2016). Pour garantir cette qualité, des ressources supplémentaires sont nécessaires, telles que du temps, des compétences, un investissement dans la technologie et la mobilisation de participants pouvant aider dans le processus (Balázs *et al*., 2021). Engager des autorités, notamment des décideurs politiques et des scientifiques, est utilisé pour renforcer la crédibilité de la qualité des données (Ekström, 2023). Les données provenant des sciences participatives bénéficient de l'application des principes FAIR – Findability, Accessibility, Interoperability et Reusability (Wilkinson *et al*., 2016). L'application de ces principes guide les citoyens et les coordinateurs lorsqu'ils utilisent les données provenant des sciences participatives. Lorsque ces principes sont appliqués, en plus du respect des 10 principes, les risques de mauvaise utilisation des données sont minimisés. Par exemple, sur la plateforme autrichienne de science citoyenne, Österreich forscht, tous les projets présentés doivent remplir un questionnaire concernant leur projet, incluant des questions sur la qualité des données, avant d'être acceptés sur la plateforme.

Dans notre revue, certaines des données de recherche et des métadonnées des projets rapportés ont été intégrées dans d'autres bases de données (nationales ou infrastructures de recherche), comme la base de données Tea Bag Index ou la base de données SoilTemp. Il est plus facile d'intégrer les données provenant des sciences participatives dans des bases de données déjà existantes (Sandén *et al*., 2021). Les données provenant des sciences participatives pourraient, par exemple, être intégrées dans l'EUSO, ou dans des bases de données nationales de surveillance des sols. En 2023, la Commission européenne a publié la proposition de « Directive sur la surveillance et la résilience des sols », appelée « Loi sur la surveillance des sols ». Ce cadre créerait une base de données commune intégrant les données au niveau de l'UE et des États membres. La Loi pourrait être une opportunité pour intégrer également les données provenant des sciences participatives dans cette base de données commune. Un représentant national pourrait être responsable d'intégrer ces données dans la base de données commune, comme il existe des contacts nationaux pour garantir que les données respectent les directives INSPIRE (INSPIRE, 2013). Une ou plusieurs personnes pourraient, par exemple, être choisies parmi les groupes d'action de mission nationale sur les sols ou les réseaux nationaux de sciences participatives qui existent déjà dans de nombreux pays européens *(comme décrit à la section 4.3)*. En intégrant les données provenant des sciences participatives dans les bases de données existantes, ces données doivent automatiquement passer par les mêmes contrôles rigoureux de qualité que toute autre donnée entrant dans cette base de données particulière. Des normes doivent également être mises en œuvre, c'est-à-dire des règles (de format et de signification) selon lesquelles les données sont décrites, enregistrées et échangées. Tout au long du processus de collecte des données, il est crucial d'appliquer des efforts diligents pour garantir des données normalisées afin qu'elles puissent être intégrées dans des bases de données à long terme (Smith *et al*., 2022), telles que celles des infrastructures de recherche LTER (Holzer et Orenstein, 2023). Selon la base de données dans laquelle les données provenant des sciences participatives seraient intégrées, cela déterminerait les exigences du processus. De plus, de nouvelles technologies, telles que l'intelligence artificielle, offrent une opportunité d'intégrer des données provenant de multiples sources d'information dans un cadre analytique commun (Ceccaroni *et al*., 2023).

4.3. Comment exploiter le potentiel des sciences participatives sur les sols ?

Nos résultats montrent que les projets de sciences participatives sur les sols alignés avec les 10 principes offrent une ressource inexploitée pour la recherche sur les sols en Europe. De plus, nous soulignons des facteurs de succès pour le développement futur des sciences participatives sur les sols agricoles.

Tout d'abord, dans notre revue, il a été rapporté que les citoyens participaient à différentes étapes du processus scientifique et étaient impliqués dans les projets de sciences participatives en tant que contributeurs de données (88 %), collaborateurs (50 %) et chefs de projet (13 %). La collaboration (63 %) a également été identifiée par les coordinateurs comme un facteur clé de succès, et les recherches antérieures ont révélé que cela représente l'une des opportunités de transformation réelle à un niveau sociétal pour la science citoyenne (Turrini *et al.*, 2018). La communauté des sciences participatives commence à explorer et adopter des méthodes « collaboratives » et « co-créées » (Senabre Hidalgo *et al.*, 2021), où l'implication va au-delà de la simple collecte de données. Lorsque les agriculteurs et les chercheurs unissent leurs forces pour développer et mettre en œuvre des projets de recherche à long terme, ils créent une combinaison gagnante qui peut conduire à un changement de comportement durable (Lobry De Bruyn *et al.*, 2017). Il est nécessaire de promouvoir davantage la co-création afin de rassembler citoyens (tels que les agriculteurs), politiciens et scientifiques tout au long du processus de recherche (Leino et Puumala, 2021), ce qui conduit finalement à des résultats politiques (Criscuolo *et al.*, 2023). Pour combler cette lacune, le concept de Living Labs et de Lighthouses a été proposé par la Commission européenne à travers la Mission de l'UE « A Soil Deal for Europe » (European Commission, 2021a). Les Living Labs et Lighthouses peuvent être des instruments clés pour l'engagement des parties prenantes dans les sciences participatives. Ces approches peuvent connecter chercheurs, agriculteurs, conseillers, citoyens et politiciens pour créer des solutions ayant des effets réels, ainsi que diffuser les pratiques durables existantes (Veerman *et al.*, 2020). La recherche menée dans les Living Labs et les Lighthouses peut contribuer à l'objectif de la Mission de l'UE de « garantir que 75 % des sols soient sains d'ici 2030 et capables de fournir des services écosystémiques essentiels », créant ainsi un véritable impact sociétal.

Deuxièmement, les novices en sciences participatives ont souligné leur grand intérêt pour l'amélioration du partage des connaissances entre pays, par exemple, le besoin de partager les approches et les résultats des sciences participatives, ainsi que d'avoir un réseau de sciences participatives durable et autonome. Des plateformes ont été mises en place pour mettre en valeur la diversité des projets disponibles. Ces plateformes offrent un accès à des réseaux nationaux de sciences participatives visant à promouvoir les sciences participatives dans certains pays, tels que l'Allemagne (Bürger schaffen Wissen, n.d.), l'Australie (Atlas of Living Australia, n.d.), la Suisse (Schweiz forscht, n.d.) et l'Autriche (Österreich forscht, n.d.) (Liu *et al.*, 2021). Certaines plateformes nationales sont consacrées à un sujet particulier, comme la plateforme en France dédiée à la biodiversité (OPEN Sciences Participatives, n.d.). En outre, il existe des plateformes transnationales, comme celle avec des projets des Pays-Bas et de la Belgique (Iedereen Wetenschapper, n.d.). À l'échelle européenne, EU-Citizen.Science (n.d.) est une plateforme en ligne créée pour partager des ressources utiles liées aux sciences participatives, telles que des outils et des directives, des bonnes pratiques et des modules de formation. De plus, certains réseaux de sciences participatives offrent également la possibilité de collaborer dans des groupes de travail sur des questions spécifiques, telles que « les aspects juridiques » ou « les sciences participatives dans les écoles ». Ces groupes impliquent une variété de parties prenantes. Leur objectif est de faire avancer les buts des réseaux de sciences participatives en partageant des ressources, des bonnes pratiques et des informations pertinentes entre les membres et au sein de la communauté plus large des sciences participatives. Assurer que les participants restent impliqués dans ces groupes de travail présente des avantages non seulement pour le réseau, mais aussi pour chaque participant (Liu *et al.*, 2021). Favoriser le partage des connaissances par le biais de réseaux de sciences participatives constitue donc un deuxième facteur de succès pour le développement des sciences participatives sur les sols. La mise en œuvre réussie des réseaux de science citoyenne à l'échelle nationale nécessite généralement un fort engagement des citoyens (Schaefer *et al.*, 2021).

Enfin, un autre facteur de succès est la communication à long terme et l'engagement des citoyens. De l'engagement des participants à leur maintien motivé, une communication efficace entre les scientifiques et les participants au projet est essentielle pour tout projet de sciences participatives (Hecker et Taddicken, 2022 ; Vattakaven *et al.*, 2022 ; Veeckman *et al.*, 2019). Cependant, Rüfenacht *et al.* (2021) ont décrit la communication comme l'un des principaux défis des projets de sciences participatives. Druschke et Seltzer (2012) ont souligné l'importance de prendre en compte les perspectives et les besoins des participants, ainsi que de maintenir une communication active entre les scientifiques et les participants au projet. De Vries *et al.* (2019) ont recommandé à ceux qui créent et dirigent des projets de sciences participatives de veiller à ce que les participants apprécient la communication concernant les informations sur leurs données collectées, les résultats du projet et les publications. Une communication réussie renforcera la motivation des participants à s'engager dans le projet et garantira leur engagement à long terme (De Vries *et al.*, 2019). Pino *et al.* (2022) ont observé une augmentation de l'engagement

communautaire dans divers projets de sciences participatives sur les sols. Le projet TeaComposition est un exemple d'engagement communautaire accru : le nombre d'écoles impliquées est passé de sept lors de la première année du projet à 50 après 4 ans (Pino *et al*., 2021). Les citoyens participant à des projets à long terme sont plus susceptibles de développer un sens de responsabilité et d'agir pour préserver l'environnement que ceux qui travaillent sur des projets à court terme (Hansen et Bonney, 2022). Par conséquent, les futurs projets de sciences participatives bénéficieront d'une meilleure compréhension des facteurs qui influencent et limitent la motivation des citoyens à un engagement à long terme (Phillips *et al*., 2019). De plus, dans notre revue, "projet très chronophage" et "financement temporaire" ont été identifiés comme les principaux défis pour les projets (n = 24). La principale raison avancée pour la fin des projets était la fin du financement (87 %). Un financement supplémentaire est donc nécessaire. Cela permettrait d'augmenter le nombre de personnels impliqués dans la communauté scientifique pour coordonner et mettre en œuvre les projets, créer des réseaux et des partenariats avec les citoyens.

5. CONCLUSION

Le sol est un bien commun, tout comme le savoir. Les sciences participatives peuvent contribuer à la connaissance des sols. Cette revue met en lumière les projets passés et actuels de sciences participatives sur les sols agricoles, en les reliant aux 10 principes des sciences participatives. Les 23 projets de sciences participatives axés sur les sols agricoles, identifiés ici, ont révélé trois groupes : (i) des projets nationaux à petit budget avec une approche de crowdsourcing, (ii) des projets européens à durée limitée et (iii) des projets régionaux et nationaux à gros budget. Nos résultats montrent que les projets de sciences participatives sur les sols alignés avec les 10 principes des sciences participatives représentent une ressource pour la recherche sur la santé des sols en Europe. Promouvoir la co-création, favoriser les réseaux de partage des connaissances et permettre une communication et un engagement à long terme avec les citoyens sont des facteurs de succès qui permettront d'exploiter cette ressource et de promouvoir davantage l'implication des sciences participatives dans les sols. Le développement ultérieur de cette approche de recherche nécessitera des ressources humaines et un financement.

DÉCLARATION SUR LA DISPONIBILITÉ DES DONNÉES

Les données qui étaient les conclusions de cette étude sont disponibles : https://doi.org/10.57745/LZBPTC.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les répondants pour leur précieux temps consacré à répondre au questionnaire. Lionel Ranjard (INRAE) et Benjamin Sanchez (INIA) sont remerciés pour leur aide dans l'amélioration de la conception, les tests et la diffusion du questionnaire. Claire Chenu (INRAE), Raisa Gerasina-Chaix (INRAE) et Saskia Keesstra (WUR) sont chaleureusement remerciées pour avoir révisé et amélioré la clarté textuelle. Cette recherche a été développée dans le cadre du Programme Européen Commun pour le SOL "Vers une gestion durable et intelligente du climat des sols agricoles" (EJP SOIL) financé par le programme Horizon 2020 de Recherche et Innovation de l'Union Européenne (Contrat de subvention n°862695).

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun intérêt financier concurrent ou relation personnelle qui pourrait avoir influencé le travail présenté dans cet article.

BIBLIOGRAPHIE

Albert A., Balázs B., Butkevičienė E., Mayer K., Perelló J. (2021). Citizen social science: New and established approaches to participation in social research. In *The science of citizen science* (pp. 119–138). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_7

Askallo GmbH (Version 2022.6). (2022). Yasemin Thies, Karlsruhe, Germany. https://www.askallo.de/

Atlas of Living Australia (n.d.). Retrieved June 5, 2023, from www.ala.org.au

Balázs B., Mooney P., Nováková E., Bastin L., Jokar Arsanjani J. (2021). Data quality in citizen science. In K. Vohland, A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), *The science of citizen science* (pp. 139–157). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_8

BMUV, German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection. (2019). Bundeskabinett beschließt umfangreiches Aktionsprogramm für den Insektenschutz. Press release 04.09.2019. Retrieved June 26, 2023, from https://www.bmuv.de/pressemitteilung/schulze-wir-koennen-das-insektensterben-stoppen/

Bonney R., Cooper C.B., Dickinson J., Kelling S., Phillips T., Rosenberg K.v., Shirk J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *Bioscience, 59*(11), 977–984. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9

Bonney R., Phillips T.B., Ballard H.L., Enck J.W. (2016). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science, 25*(1), 2–16. https://doi.org/10.1177/0963662515607406

Bowser A., Wiggins A., Shanley L., Preece J., Henderson S. (2014). Sharing data while protecting privacy in citizen science. *Interactions, 21*(1), 70–73. https://doi.org/10.1145/2540032

Bürger schaffen Wissen (n.d.). Retrieved June 5, 2023, from www.buergerschaffenwissen.de

Burton V.J., Cameron E.K. (2021). Learning more about earthworms with citizen science. *Frontiers for Young Minds, 8*, 548525. https://doi.org/10.3389/frym.2020.548525

Ceccaroni L., Olivier J., Roger E., Bibby J., Flemons P., Michael K., Joly A. (2023). Advancing the productivity of science with citizen science and

artificial intelligence. In *Artificial intelligence in science: Challenges, opportunities and the future of research*. Editions OCDE. https://doi.org/10.1787/69563b12-en

Cooper C.B., Rasmussen L.M., Jones E.D. (2021). Perspective: The power (dynamics) of open data in citizen science. *Frontiers in Climate, 3*, 637037. https://doi.org/10.3389/fclim.2021.637037

Criscuolo L., L'Astorina A., Van der Wal R., Gray L.C. (2023). Recent contributions of citizen science on sustainability policies: A critical review. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 31*, 100423. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100423

Daebeler A., Petrova E., Kinz E., Grausenburger S., Berthold H., Sandén T., Angel R. (2022). Pairing litter decomposition with microbial community structures using the tea bag index (TBI). *The Soil, 8*(1), 163–176. https://doi.org/10.5194/soil-8-163-2022

De Vries M., Land-Zandstra A., Smeets I. (2019). Citizen Scientists' preferences for communication of scientific output: A literature review. *Citizen Science: Theory and Practice, 4*(1), 2. https://doi.org/10.5334/cstp.136

Druschke C.G., Seltzer C.E. (2012). Failures of engagement: Lessons learned from a citizen science pilot study. *Applied Environmental Education & Communication, 11*(3–4), 178–188. https://doi.org/10.1080/1533015X.2012.777224

ECSA (European Citizen Science Association). (2015). Ten principles of citizen science. ECSA. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/XPR2N

Ekström B. (2023). Thousands of examining eyes: Credibility, authority and validity in biodiversity citizen science data production. *Aslib Journal of Information Management, 75*(1), 149–170. https://doi.org/10.1108/AJIM-10-2021-0292

EU-Citizen.Science (n.d.). Retrieved June 5, 2023, from eu-citizen.science

European Commission (2016). *Open innovation, open science, open to the world – A vision for Europe*. Publications Office of the EU.

European Commission. (2017). *OSPP-REC: Open science policy platform recommendations*. Publications Office of the EU.

European Commission. (2021a). A Soil Deal for Europe: 100 Living Labs and Lighthouses to lead the transition towards healthy soils by 2030. Implementation Plan. Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. Internal working document of the European Commission.

European Commission. (2021b). *Horizon Europe, open science – Early knowledge and data sharing, and open collaboration*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/18252

Fantappiè M., Peruginelli G., Conti S., Rennes S., Van Egmond F., Le Bas C. (2021). Deliverable 6.2 Report on the national and EU regulations on agricultural soil data sharing and national monitoring activities. EJP SOIL Programme. Retrieved from https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.2_Report_on_national_and_EU_regulations_on_agricultural_soil_data_sharing_v2.pdf

FAO et ITPS (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

Follett R., Strezov V. (2015). An Analysis of Citizen Science Based Research: Usage and Publication Patterns. PLOS ONE, 10(11), e0143687. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143687

Forrester T.D., Baker M., Costello R., Kays R., Parsons A.W., McShea W.J. (2017). Creating advocates for mammal conservation through citizen science. Biological Conservation, 208, 98–105. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.06.025

Fraisl D., Campbell J., See L., Wehn U., Wardlaw J., Gold M., Moorthy I., Arias R., Piera J., Oliver J.L., Masó J., Penker M., Fritz S. (2020). Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals. Sustainability Science, 15(6), 1735-1751. https://doi.org/10.1007/s11625-020-00833-7

Fraisl D., Hager G., Bedessem B., Gold M., Hsing P.-Y., Danielsen F., Hitchcock C.B., Hulbert J.M., Piera J., Spiers H., Thiel M., Haklay M. (2022). Citizen science in environmental and ecological sciences. Nature Reviews Methods Primers, 2(1), 64. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00144-4

Frelih-Larsen A., Hinzmann M., Ittner S. (2018). The 'Invisible' Subsoil: An Exploratory View of Societal Acceptance of Subsoil Management in Germany. Sustainability, 10(9), 3006. https://doi.org/10.3390/su10093006

Gascuel C., Loiseau-Dubosc P., Auclerc A., Bougon N., Caquet T., Lerouyer V., Pierart A., Ranjard L., Resche-Rigon F., Roturier C., Sauter J., Serin L. (2023). Sols, sciences et recherches participatives : comment consolider et fédérer le foisonnement d'initiatives en France ? Nature Sciences et Sociétés. https://doi.org/10.1051/nss/2023014

Giraudoux P (2023). _pgirmess: Spatial Analysis and Data Mining for Field Ecologists_. R package version 2.0.2, <https://CRAN.R-project.org/package=pgirmess>.

Hallmann C.A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., Stenmans W., Müller A., Sumser H., Hörren T., Goulson D., De Kroon H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. PLOS ONE, 12(10), e0185809. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809

Hansen B., Bonney P. (2022). Learning from successful long-term citizen science programs. Pacific Conservation Biology. https://doi.org/10.1071/PC21065

Head J.S., Crockatt M.E., Didarali Z., Woodward M.-J., Emmett B.A. (2020). The Role of Citizen Science in Meeting SDG Targets around Soil Health. Sustainability, 12(24), 10254. https://doi.org/10.3390/su122410254

Hecker S., Taddicken M. (2022). Deconstructing citizen science: a framework on communication and interaction using the concept of roles. Journal of Science Communication, 21(01), A07. https://doi.org/10.22323/2.21010207

Heigl F., Kieslinger B., Paul K.T., Uhlik J., Dörler D. (2019). Toward an international definition of citizen science. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(17), 8089-8092. https://doi.org/10.1073/pnas.1903393116

Helming K., Daedlow K., Paul C., Techen A.-K., Bartke S., Bartkowski B., Kaiser D., Wollschläger U., Vogel H.-J. (2018). Managing soil functions for a sustainable bioeconomy-Assessment framework and state of the art. Land Degradation & Development, 29(9), 3112–3126. https://doi.org/10.1002/ldr.3066

Holzer J.M., Orenstein D.E. (2023). Organizational transformation for greater sustainability impact: recent changes in a scientific research infrastructure in Europe. Landscape Ecology. https://doi.org/10.1007/s10980-023-01624-y

Iedereen Wetenschapper (n.d.). Available at: www.iedereenwetenschapper.be [Last accessed 5 June 2023]

INSPIRE (2013). Infrastructure for Spatial Information in Europe. Available at: https://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_SO_v3.0.pdf [Last accessed 9 October 2023]

Haklay M., Dörler D., Heigl F., Manzon, M., Hecker S., Vohland K. (2021). What Is Citizen Science? The Challenges of Definition. In: Vohland, K., et al. The Science of Citizen Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_2

Kosmala M., Wiggins A., Swanson A., Simmons B. (2016). Assessing data quality in citizen science. Frontiers in Ecology and the Environment, 14(10), 551–560. https://doi.org/10.1002/fee.1436

Leino H., Puumala E. (2021). What can co-creation do for the citizens? Applying co-creation for the promotion of participation in cities. Environment and Planning C: Politics and Space, 39(4), 781–799. https://doi.org/10.1177/2399654420957337

Liu H.Y., Dörler D., Heigl F., Grossberndt S. (2021). Citizen Science Platforms. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, K. Wagenknecht (Eds.), The Science of Citizen Science (pp. 439-459). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_22

Lobry De Bruyn L., Jenkins A., Samson-Liebig S. (2017). Lessons Learnt: Sharing Soil Knowledge to Improve Land Management and Sustainable

Soil Use. Soil Science Society of America Journal, 81(3), 427–438. https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0403

MacEwan R.J., MacEwan A.S.A., Toland A.R. (2017). Engendering Connectivity to Soil Through Aesthetics (pp. 351–363). https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_31

Mason E., Gascuel-Odoux C., Aldrian U., Sun H., Miloczki J., Götzinger S., Burton V.J., Rienks F., Di Lonardo S., Sandén T. (2024). Participatory soil citizen science: An unexploited resource for European soil research. European Journal of Soil Science, e13470. https://doi.org/10.1111/ejss.13470

Mazumdar S., Ceccaroni L., Piera J., Hölker F., Berre A.J., Arlinghaus R., Bowser A. (2018). Citizen science technologies and new opportunities for participation. In Citizen Science (pp. 303–320). UCL Press. https://doi.org/10.2307/j.ctv550cf2.28

Mol G., Keesstra S. (2012). Soil science in a changing world. Current Opinion in Environmental Sustainability, 4(5), 473–477. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.013

Nascimento S., Rubio Iglesias J.M., Owen R., Shanley L. (2018). Citizen science for policy formulation and implementation. In: Hecker, S., Haklay, M., Bowser, A., Makuch, Z., Vogel, J. & Bonn, A. 2018. Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy. UCL Press, London. https://doi.org/10.14324/111.9781787352339

OPEN Sciences Participatives (n.d.). Available at: www.open-sciences-participatives.org [Last accessed 5 June 2023]

Österreich forscht (n.d.). Available at: www.citizen-science.at [Last accessed 5 June 2023]

Panagos P., Montanarella L., Barbero M., Schneegans A., Aguglia L., Jones A. (2022). Soil priorities in the European Union. Geoderma Regional, 29, e00510. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00510

Perelló J., Klimczuk A., Land-Zandstra A., Vohland K., Wagenknecht K., Narraway C., Lemmens R., Ponti M. (2021). The Recent Past and Possible Futures of Citizen Science: Final Remarks. In The Science of Citizen Science (pp. 517–529). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_26

Phillips T., Porticella N., Constas M., Bonney R. (2018). A Framework for Articulating and Measuring Individual Learning Outcomes from Participation in Citizen Science. Citizen Science: Theory and Practice, 3(2), 3. https://doi.org/10.5334/cstp.126

Phillips T.B., Ballard H.L., Lewenstein B.v., Bonney R. (2019). Engagement in science through citizen science: Moving beyond data collection. Science Education, 103(3), 665–690. https://doi.org/10.1002/sce.21501

Pierce R., Evram M. (2022). Getting it right: implementing data protection in citizen science research. Insights the UKSG Journal, 35. https://doi.org/10.1629/uksg.538

Pino V., McBratney A., O'Brien E., Ng W. (2021). Boosting soil citizen-science using Tea Bag Index method towards soil security in Australia. Soil Security, 5, 100016. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100016

Pino V., McBratney A., O'Brien E., Singh K., Pozza L. (2022). Citizen science & soil connectivity: Where are we? Soil Security, 9, 100073. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100073

Pocock M.J.O., Tweddle J.C., Savage J., Robinson L.D., Roy H.E. (2017). The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science. PLOS ONE, 12(4), e0172579. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172579

Pocock M.J.O., Chandler M., Bonney R., Thornhill I., Albin A., August T., Bachman S., Brown P. M.J., Cunha D.G.F., Grez A., Jackson C., Peters M., Rabarijaon N.R., Roy H.E., Zaviezo T., Danielsen F. (2018). A Vision for Global Biodiversity Monitoring With Citizen Science (pp. 169–223). https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2018.06.003

Popp J., Lakner Z., Harangi-Rákos M., Fári M. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 559–578. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: https://www.R-project.org/

Ranjard L. (2020). Sciences participatives au service de la qualité écologique des sols. Techniques de l'Ingénieur, 24 pp.

Ranjard L., Sauter J., Auclerc A., Chauvin C., Cluzeau D., Mereau D., Loiseau-Dubosc P., Lemercier B., d'Oiron E., Raous S., Roturier C., Rovillé M., Serin L., Gascuel C. (2022). Sciences et recherches participatives sur les sols en France : bilan et perspectives, Étude et Gestion des Sols, 29, 381-393

Reynolds C., Oakden L., West S., Pateman R., Elliott C. (2021). Citizen Science and Food: A Review. London: Food Standards Agency. doi: 10.46756/sci.fsa.nao903

Robinson J., Cawthray J., West S., Bonn A., Ansine J. (2018). Ten principles of citizen science. In: Hecker S., Haklay M., Bowser A., Makuch Z., Vogel J. & Bonn A. 2018. Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy. UCL Press, London. https://doi.org/10.14324/111.9781787352339

Roche J., Bell L., Galvão C., Golumbic Y.N., Kloetzer L., Knoben N., Laakso M., Lorke J., Mannion G., Massetti L., Mauchline A., Pata K., Ruck A., Taraba P., Winter S. (2020). Citizen Science, Education, and Learning: Challenges and Opportunities. Frontiers in Sociology, 5. https://doi.org/10.3389/fsoc.2020.613814

Rüfenacht S., Woods T., Agnello G., Gold M., Hummer P., Land-Zandstra A., Sieber A. (2021). Communication and Dissemination in Citizen Science. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), The Science of Citizen Science (pp. 475-494). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_24

Ryan, S. F., Adamson, N. L., Aktipis, A., Andersen, L. K., Austin, R., Barnes, L., Beasley, M. R., Bedell, K. D., Briggs, S., Chapman, B., Cooper, C. B., Corn, J. O., Creamer, N. G., Delborne, J. A., Domenico, P., Driscoll, E., Goodwin, J., Hjarding, A., Hulbert, J. M., & Dunn, R. R. (2018). The role of citizen science in addressing grand challenges in food and agriculture research. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 285(1891), 20181977. https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1977

Sandén T., Wawra A., Berthold H., Miloczki J., Schweinzer A., Gschmeidler B., Spiegel H., Debeljak M., Trajanov A. (2021). TeaTime4Schools: Using Data Mining Techniques to Model Litter Decomposition in Austrian Urban School Soils. Frontiers in Ecology and Evolution, 9. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.703794

Schaefer T., Kieslinger B., Brandt M., Van den Bogaert V. (2021). Evaluation in Citizen Science: The Art of Tracing a Moving Target. In The Science of Citizen Science (pp. 495–514). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_25

Schillaci C., Muntwyler A., Marechal A., Orgiazzi A., Jones A., Ciupagea C., Belitrandi D., De Medici D., De Rosa D., Vieira D., Matthews F., Martin-Jimenez J., Koeninger J., Liakos L., Montanarella L., Labouyrie M., Van Liedekerke M., Panagos P., Scarpa S., Wojda P. (2022). European soil observatory (EUSO) structure and perspectives, EGU General Assembly 2022, Vienna, EGU22-5248, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5248

Schirpke U., Kohler M., Leitinger G., Fontana V., Tasser E., Tappeiner U. (2017). Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. Ecosystem Services, 26, 79–94. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.008

Schuttler S.G., Sorensen A.E., Jordan R.C., Cooper C., Shwartz A. (2018). Bridging the nature gap: can citizen science reverse the extinction of experience? Frontiers in Ecology and the Environment, 16(7), 405–411. https://doi.org/10.1002/fee.1826

Schweiz forscht (n.d.). Available at: www.schweizforscht.ch [Last accessed 5 June 2023]

Senabre Hidalgo E., Perelló J., Becker F., Bonhoure I., Legris M., Cigarini A. (2021). Participation and Co-creation in Citizen Science. In: Vohland K., A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R.

Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), The Science of Citizen Science (pp. 199-218). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_11

Smith V., French L., Vincent S., Woodburn M., Addink W., Arvanitidis C., Bánki O., Casino A., Dusoulier F., Glöckler F., Hobern D., Kalfatovic M.R., Koureas D., Mergen P., Miller J., Schulman L., Juslén A. (2022). Research Infrastructure Contact Zones: a framework and dataset to characterise the activities of major biodiversity informatics initiatives. Biodiversity Data Journal, 10. https://doi.org/10.3897/BDJ.10.e82953

Somerwill L., Wehn U. (2022). How to measure the impact of citizen science on environmental attitudes, behaviour and knowledge? A review of state-of-the-art approaches. Environmental Sciences Europe, 34(1), 18. https://doi.org/10.1186/s12302-022-00596-1

Suman A.B., Pierce R. (2018). Challenges for Citizen Science and the EU Open Science Agenda under the GDPR. European Data Protection Law Review, 4(3), 284–295. https://doi.org/10.21552/edpl/2018/3/7

Trimble M., Berkes F. (2013). Participatory research towards co-management: Lessons from artisanal fisheries in coastal Uruguay. Journal of Environmental Management, 128, 768–778. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.032

Turrini T., Dörler D., Richter A., Heigl F., Bonn A. (2018). The threefold potential of environmental citizen science - Generating knowledge, creating learning opportunities and enabling civic participation. Biological Conservation, 225, 176-186. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.03.024

Van der Putten W.H., Bardgett R.D., Farfan M., Montanarella L., Six J., Wall D.H. (2023). Soil biodiversity needs policy without borders. Science, 379(6627), 32–34. https://doi.org/10.1126/science.abn7248

Vattakaven T., Barve V., Ramaswami G., Singh P., Jagannathan S., Dhandapani B. (2022). Best Practices for Data Management in Citizen Science - An Indian Outlook. Biodiversity Informatics, 17. https://doi.org/10.17161/bi.v17i.16441

Veeckman C., Talboom S., Gijsel L., Devoghel H., Duerinckx A. (2019). Communication in Citizen Science. A practical guide to communication and engagement in citizen science. SCIVIL, Leuven, Belgium.

Veerman C., Correia T.P., Bastioli C., Biro B., Bouma J., Ciencala E., Emmett B., Frison E.A., Grand A., Filchew L.H., Kriauciniene Z., Pogrzeba M., Soussana J.-F., Olmo C.V., Wittkowski R (2020). Caring for soil is caring for life - Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate. Brussels: European Commission.

Von Gönner J., Herrmann T.M., Bruckermann T., Eichinger M., Hecker S., Klan F., Lorke J., Richter A., Sturm U., Voigt-Heucke S., Brink W., Liedtke C., Premke-Kraus M., Altmann C., Bauhus W., Bengtsson L., Büermann A., Dietrich P., Dörler D., Bonn A. (2023). Citizen science's transformative impact on science, citizen empowerment and socio-political processes. Socio-Ecological Practice Research, 5(1), 11–33. https://doi.org/10.1007/s42532-022-00136-4

Wehn U., Gharesifard M., Ceccaroni L., Joyce H., Ajates R., Woods S., Bilbao A., Parkinson S., Gold M., Wheatland J. (2021). Impact assessment of citizen science: state of the art and guiding principles for a consolidated approach. Sustainability Science, 16(5), 1683–1699. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00959-2

Wickham H. (2016) ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.

Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Grolemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T., Miller E., Bache S., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H. (2019). "Welcome to the tidyverse". Journal of Open Source Software, *4*(43), 1686

Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg Ij.J., Appleton G., Axton M., Baak A., Blomberg N., Boiten J.-W., da Silva Santos L.B., Bourne P.E., Bouwman J., Brookes A.J., Clark T., Crosas M., Dillo I., Dumon O., Edmunds S., Evelo C.T., Finkers R., Mons B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 3(1), 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18